

Evaluation of the technical-environmental performance of coconut and cocoa husk briquettes as an alternative to shihuahuaco charcoal in Yurimaguas-Peru

Angela Yuliana Lagos Laguna¹; Adriana Pilar Ninantay Flores¹; Jose-Carlos Lama¹; Franco Canziani Amico¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, u20201e731@upc.edu.pe, u20201e837@upc.edu.pe,
PCIGJLAM@upc.edu.pe, PCIGFCAN@upc.edu.pe

Abstract— Air pollution from burning charcoal for cooking poses an environmental problem not only because of the health risks to millions of people, but also because of the depletion of vulnerable timber species. Peru is no exception, and this study evaluates the technical and environmental performance of briquettes made from Theobroma cacao (cacao) and Cocos nucifera (coconut) husks, generated as waste in the district of Yurimaguas, Loreto region (Peru), as an energy alternative to shihuahuaco (Dipteryx micrantha) charcoal, which is consumed in food preparation establishments and is a vulnerable species in that region. A completely randomized design (CRD) with a 5×2 factorial arrangement was applied, considering the type of biomass and the proportion of natural binder (10% and 15% cassava starch), to analyze the physicochemical properties of the briquettes according to ISO 17225-3. The briquettes presented moisture, ash, and calorific value values within the established ranges, with the T2Y2 mixture (75% cacao, 25% coconut, and 15% binder) identified as the optimal formulation. Furthermore, combustion tests, performed with DustMate equipment and a MultiRAE gas analyzer, showed a reduction of over 50% in CO, PM₁₀, and PM_{2.5} emissions compared to shihuahuaco charcoal. The results demonstrate that coconut and cacao briquettes are a competitive energy alternative, both technically and environmentally, for the progressive replacement of charcoal.

Keywords— Briquettes, shihuahuaco, biomass, atmospheric emissions, sustainable energy.

Evaluación del desempeño técnico-ambiental de briquetas de cáscaras de coco y cacao como alternativa al carbón de shihuahuaco en Yurimaguas-Perú

Angela Yuliana Lagos Laguna¹; Adriana Pilar Ninantay Flores¹; Jose-Carlos Lama¹; Franco Canziani Amico¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, u20201e731@upc.edu.pe, u20201e837@upc.edu.pe,
PCIGJLAM@upc.edu.pe, PCIGFCAN@upc.edu.pe

Resumen– La contaminación atmosférica derivada de la combustión de carbón vegetal para cocción de alimentos representa una problemática ambiental no solo por los daños a la salud de millones de personas, también por la depredación de especies maderables vulnerables asociadas. El Perú no es ajeno a ello, por lo que este estudio evalúa el desempeño técnico y ambiental de briquetas elaboradas a partir de cáscaras de *Theobroma cacao* (cacao) y *Cocos nucifera* (coco) generadas como residuos en el distrito de Yurimaguas, región Loreto (Perú) como alternativa energética al carbón de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*), consumido en establecimientos de preparación de alimentos y especie con grado de vulnerabilidad en dicha región. Se aplicó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con arreglo factorial 5×2, considerando el tipo de biomasa y la proporción de aglutinante natural (almidón de yuca al 10 % y 15 %), para analizar las propiedades fisicoquímicas de las briquetas conforme a la Norma ISO 17225-3. Las briquetas presentaron valores de humedad, cenizas y poder calorífico dentro de los rangos establecidos, identificándose la mezcla T2Y2 (75 % cacao-25 % coco y 15 % de aglutinante) como la formulación óptima. Además, las pruebas de combustión, realizadas con los equipos DustMate y analizador de gases MultiRAE, evidenciaron una reducción superior al 50% en las emisiones de CO, PM₁₀ y PM_{2.5} respecto al carbón de shihuahuaco. Los resultados demuestran que las briquetas de coco y cacao son una alternativa energética competitiva tanto en lo técnico como en lo ambiental para la sustitución progresiva del carbón vegetal.

Palabras clave– Briquetas, shihuahuaco, biomasa, emisiones atmosféricas, energía sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire constituye un riesgo significativo, afectando a poblaciones de todos los niveles de ingreso. Entre los principales contaminantes se encuentra el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂), generados principalmente por la quema de combustibles fósiles como por el uso intensivo de biocombustibles sólidos, especialmente del carbón vegetal empleado en actividades domésticas y comerciales [1]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) enfatiza la necesidad de reducir los niveles de contaminación atmosférica, ya que en 2019 la exposición a material particulado fino provocó aproximadamente 4,2 millones de muertes prematuras, principalmente en países de ingresos bajos y medios [1].

En países en desarrollo, las ciudades concentran una gran parte de las emisiones atmosféricas, donde las actividades comerciales y gastronómicas que emplean combustibles sólidos representan una fuente relevante de contaminación [2] [3]. Estudios recientes evidencian que la combustión de carbón vegetal en establecimientos genera emisiones considerables de NO_x, CO y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Además, contribuyen de manera significativa a las concentraciones de PM_{2.5} en zonas urbanas [4] [5].

Por otro lado, el uso extendido de carbón vegetal como fuente de energía, especialmente el proveniente de especies amazónicas como el shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*), representa una grave amenaza ambiental asociada a la degradación de los ecosistemas forestales y la depredación de especies maderables [6] [7]. A pesar de la existencia de regulaciones forestales orientadas al aprovechamiento sostenible en el Perú, persiste el uso de carbón proveniente de la tala ilegal debido a su desempeño energético. Asimismo, ciudades como Yurimaguas, en Loreto, presentan condiciones de calidad del aire clasificadas como moderadas, con concentraciones promedio de PM_{2.5} que superan el límite anual recomendado por la OMS [8] [2].

En este escenario, las briquetas de biomasa emergen como una alternativa de valorización energética de menor impacto ambiental. A diferencia del carbón, su fabricación considera el prensado de material biomásico residual de producción agrícola junto con aglutinantes naturales, como el almidón de yuca, que facilita la cohesión del material y mejora su densidad [9] [10]. En el Perú, la biomasa de cacao y coco presenta un gran potencial: el país ocupa el noveno lugar mundial en producción de cacao, generando residuos equivalentes al 52–70% del peso total de la fruta [11] [12]. Por su parte, la producción de coco alcanza volúmenes significativos en regiones amazónicas [13]. Estas biomásas, además, poseen características adecuadas para la producción de briquetas por su alto poder calorífico y bajo contenido de humedad [14] [15]. Sin embargo, en el Perú aún no existe una norma técnica específica que regule la producción y calidad de las briquetas de biomasa, a diferencia de otros países de la región como Colombia, que cuenta con la NTC 2060:1987 [16], que define los requisitos para briquetas domésticas, mientras que Argentina aplica la Norma ISO 17225-3, la cual fija parámetros mínimos de calidad para

biocombustibles sólidos [17]. Esta ausencia normativa para el caso peruano representa una oportunidad para generar evidencia técnica que contribuya al desarrollo de lineamientos nacionales.

Desde el punto de vista técnico, diversos estudios refuerzan el potencial de la biomasa como fuente de energía renovable. Teóricamente, parámetros como el contenido de humedad y la densidad determinan la eficiencia de ignición y durabilidad física del biocombustible, mientras que el contenido de cenizas y poder calorífico definen la pureza energética y la capacidad de transferencia de calor durante la combustión. Estos parámetros son fundamentales para su clasificación bajo la Norma ISO 17225-3 [17]. La norma establece criterios esenciales sobre el contenido de cenizas y poder calorífico, los cuales son determinantes para su aplicación energética [17] [18]. Específicamente, las briquetas obtenidas de residuos agrícolas de coco o cacao han demostrado en diversos estudios alcanzar valores caloríficos elevados y reducciones significativas en las emisiones de CO y PM_{2.5} respecto al carbón tradicional [18] [19] [20].

Por otro lado, el tipo y cantidad de aglutinante utilizado también impacta en la densidad de la briqueta, por lo que una briquetadora con una presión de compactación adecuada puede producir una briqueta suficientemente densa [18]. Existen estudios que recomiendan que el contenido de aglutinante se encuentre en el rango de 10 al 15% para equilibrar tanto la eficiencia de la gestión de combustión como el aprovechamiento del calor generado [10] [21].

Otros han demostrado que la combustión de briquetas de biomasa puede reducir de manera importante las emisiones de contaminantes atmosféricos, como CO y material particulado, en comparación con el carbón vegetal convencional. Estas reducciones están relacionadas con la composición de la biomasa, la granulometría del material y el contenido de aglutinante. Estos aspectos refuerzan la importancia de evaluar de manera integral tanto el desempeño energético como el impacto ambiental de las briquetas [22] [21].

Pese a estos antecedentes, las briquetas de biomasa elaboradas a partir de cacao y coco no han sido suficientemente evaluadas en contextos amazónicos con alto consumo de carbón de shihuahuaco. En este contexto, el problema de investigación se centra en la necesidad de contar con diversas alternativas energéticas que permitan sustituir el uso de carbón de shihuahuaco en escenarios como Yurimaguas. El presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño técnico y ambiental de briquetas elaboradas a partir de cáscaras de coco y cacao como alternativa al carbón de shihuahuaco. Para ello, se analizan diversas combinaciones de biomasa y aglutinante, luego se contrastan sus propiedades fisicoquímicas con los parámetros establecidos en la Norma ISO 17225-3 y se evalúa su impacto ambiental mediante la comparación de emisiones de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y monóxido de carbono (CO) frente al carbón vegetal tradicional.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. CASO DE ESTUDIO

El Fundo “Mamá Imelda”, se encuentra ubicado en el distrito de Yurimaguas, provincia de Alto Amazonas, departamento de Loreto; el mismo que se constituye en una unidad productiva agrícola de pequeña escala, con características representativas de la zona y una superficie cultivada diversa, orientada principalmente a la producción de cacao y coco.



Fig. 1 Ubicación del Fundo “Mamá Imelda”

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) comprende aproximadamente 6 400 plantones, distribuidos en un área cercana a 4 hectáreas, siendo la principal actividad económica del fundo. La producción se comercializa en forma de pepas secas de cacao, las cuales son vendidas a una empresa ubicada en la región, dedicada a la fabricación de chocolate. Este proceso productivo genera como subproducto la cáscara de cacao, que actualmente no es aprovechada y es tratada mayormente como residuo agrícola. Por su parte, el cultivo de coco (*Cocos nucifera*) ocupa aproximadamente 1 hectárea y cumple una función complementaria dentro del fundo. Su producción está destinada principalmente a la venta local a través de un negocio familiar, así como al consumo doméstico cotidiano. En este proceso, el aprovechamiento del coco se concentra fundamentalmente en la pulpa y el agua de coco, mientras que la cáscara constituye el principal residuo generado. Adicionalmente, el fundo incorpora otros cultivos de menor escala como ajíes, pimientos, culantro y platanos entre otras variedades agrícolas, lo que refleja un sistema productivo diversificado propio de la agricultura familiar amazónica.

En los últimos años, el cultivo de cacao ha experimentado un incremento sostenido en el distrito debido a que representa una alternativa económicamente más rentable frente a cultivos tradicionales como el maíz, arroz o frejol. No obstante, esta expansión ha generado una disminución progresiva del precio de venta, como consecuencia del aumento de la oferta, dado que un número creciente de agricultores ha optado por sustituir otros cultivos por cacao. En este contexto, el Fundo Mama

Imelda se presenta como un escenario representativo para evaluar estrategias de valorización de residuos agrícolas, en particular las cáscaras de cacao y coco, mediante su uso como materia prima para la elaboración de briquetas energéticas ecológicas.

B. Materiales y métodos

La investigación presenta un enfoque cuantitativo y un diseño experimental-comparado. Se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con arreglo factorial 5x2 para evaluar el efecto de la composición de biomasa y del porcentaje de aglutinante sobre las propiedades fisicoquímicas de las briquetas. Los factores evaluados fueron la proporción de cáscara de cacao y coco en cinco niveles de mezcla y el porcentaje de almidón de yuca en dos niveles de 10 % y 15 %. Como resultado se obtuvieron 10 tratamientos experimentales con tres repeticiones, un total de 30 briquetas. La variable independiente fue la formulación de la briketa, mientras que las variables dependientes fueron humedad, cenizas, densidad aparente, poder calorífico y emisiones de CO, PM_{2.5} y PM₁₀.

La muestra estuvo conformada por 10 kg de cáscara de cacao y 10 kg de cáscara de coco, recolectados en el Fundo “Mamá Imelda”, las cuales fueron la materia prima para la elaboración de las unidades experimentales. La información fue recolectada mediante técnicas de experimentación controlada, ensayos fisicoquímicos de laboratorio, comparación normativa con la ISO 17225-3 y medición de emisiones durante la combustión. Como instrumentos de recolección y medición se emplearon fichas de registro, balanza, molino manual, tamiz de 1 mm, briquetadora artesanal, calorímetro de bomba, analizador portátil de gases y el equipo DustMate.

Los tipos de biomasa evaluados fueron residuos de la producción agrícola presentada, es decir, cáscaras de coco (*Cocos nucifera*) y cacao (*Theobroma cacao*), recolectadas en el fundo en mención. Se procesó aproximadamente 10 kg de cada tipo de residuo, los cuales fueron transportados a la ciudad de Lima para su acondicionamiento y posterior elaboración de briquetas.

Por su parte, se empleó almidón de yuca (*Manihot esculenta*) como aglutinante natural, incorporado en proporciones de 10 % y 15 % respecto al peso seco de la biomasa. Durante la etapa de mezclado se utilizó agua potable en una proporción equivalente al peso inicial de la biomasa residual, con el fin de facilitar la homogeneización y compactación del material. Previamente, la biomasa fue sometida a reducción de tamaño mediante un molino manual y clasificada con un tamiz de 1 mm.

Para la caracterización de las briquetas se empleó un calorímetro de bomba para la determinación del poder calorífico, así como un analizador portátil de gases y un equipo *DustMate* para la medición de monóxido de carbono (CO) y material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}. Todos los equipos de medición pertenecen al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

1) Construcción de la briquetadora

Se fabricó una briquetadora mecánica artesanal de prensado en frío con el propósito de compactar homogéneamente las mezclas de biomasa. El armazón se construyó con cuatro vigas de madera de pino ensambladas en forma de marco, sobre las cuales se dispuso un molde cilíndrico de PVC que definió las dimensiones de las briquetas. Se adicionó un tubo de 15mm de diámetro y 10 cm de alto como molde del orificio central de las briquetas. La compactación planificó efectuarse durante un tiempo de 10 minutos por mezcla mediante una gata hidráulica tipo botella de 2 toneladas, alineada paralelamente con el molde para garantizar una distribución uniforme de la presión [21].

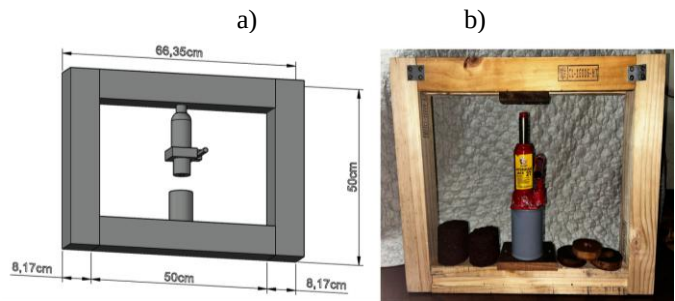


Fig. 2 a) Diseño y medidas de la máquina para la fabricación de briquetas y b) Briquetadora final construida.

2) Elaboración de las briquetas

Se elaboraron briquetas considerando cinco combinaciones de biomasa y dos niveles de aglutinante, conforme a lo establecido en la Tabla 1. En total, se desarrollaron 10 tratamientos experimentales, cada uno con tres repeticiones, totalizando 30 briquetas, las cuales se secaron a temperatura ambiente durante 72 horas [22], [31] antes de su evaluación (Fig. 3).

TABLA 1
TRATAMIENTO Y COMBINACIONES DE BRIQUETAS
Mezcla

		75%	50%	25%	0%
Almidón de yuca (Y)	100%	Cacao +	Cacao +	Cacao +	Cacao +
	Cacao +	25%	50%	75%	100%
	0% Coco	Coco	Coco	Coco	Coco
	(T1)	(T2)	(T3)	(T4)	(T5)
10% (Y1)	T1Y1	T2Y1	T3Y1	T4Y1	T5Y1
15% (Y2)	T1Y2	T2Y2	T3Y2	T4Y2	T5Y2

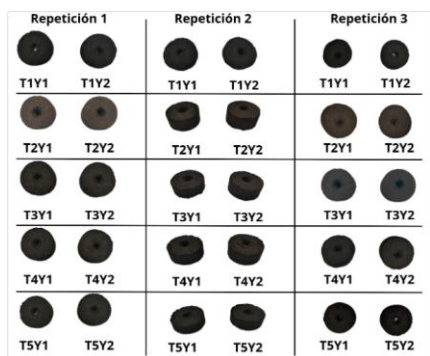


Fig. 3 Tratamientos experimentales de briquetas con tres repeticiones, cinco combinaciones de mezcla y dos niveles de aglutinante.

Para cada tratamiento experimental, las biomásas de cáscara de cacao y coco fueron pesadas individualmente de acuerdo con la combinación establecida, sumando un peso total de 50 g de biomasa seca, y mezcladas con el aglutinante de almidón de yuca previamente hidratado. Para la hidratación del aglutinante se empleó un volumen constante de 50 mL de agua en todos los tratamientos. Posteriormente, la mezcla obtenida fue introducida en el molde de la briquetadora y sometida a presión mediante una gata hidráulica, manteniéndose el proceso de compactación durante un tiempo adecuado de 10 minutos. Dado que el sistema de briquetado empleado fue de tipo artesanal, la presión aplicada se caracterizó como la máxima presión admitida por el equipo, sin comprometer su estructura, manteniendo una compactación uniforme durante la fabricación de las briquetas [23].

En la Fig. 4 se muestra el proceso de fabricación de briquetas a partir de residuos agrícolas de cáscara de cacao y coco con la adición del aglutinante natural.

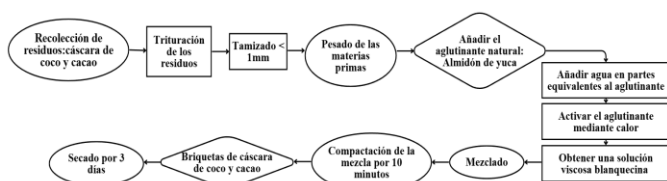


Fig. 4 Proceso de fabricación de las briquetas de cáscara de coco y cacao.

3) Determinación de propiedades fisicoquímicas

Las briquetas secas fueron analizadas en el Laboratorio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos siguiendo métodos normalizados por ASTM:

- Porcentaje de humedad: secado gravimétrico a 105 °C durante 1 hora (ASTM D3173).
- Contenido de cenizas: incineración a 550 °C durante 4 horas (ASTM D3174).

- Densidad aparente: por desplazamiento volumétrico en probeta (ASTM D2854).
- Poder calorífico superior (PCS): determinado mediante calorímetro de bomba (ASTM D5865).

Estos ensayos permitieron identificar las briquetas que cumplieran con los rangos establecidos por la Norma ISO 17225-3, utilizada como referencia para biocombustibles sólidos.

4) Comparación técnica con la Norma ISO 17225-3

Los ensayos fisicoquímicos realizados permitieron identificar las briquetas que cumplen con los rangos establecidos por la Norma ISO 17225-3, utilizada como estándar de referencia. Cabe precisar que dicha norma se emplea únicamente como criterio comparativo y no como un mecanismo de certificación de las briquetas, considerando la inexistencia de una normativa nacional específica en el Perú para este tipo de biocombustibles. En ese sentido, las briquetas que alcanzaron los parámetros de referencia establecidos fueron seleccionadas para las pruebas de combustión, con la finalidad de evaluar su desempeño energético y determinar sus emisiones atmosféricas.

5) Evaluación de emisiones atmosféricas

Las briquetas que cumplieron los criterios normativos se sometieron a pruebas comparativas de combustión frente al carbón de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*) para evaluar su desempeño ambiental. Las mediciones se realizaron empleando un analizador portátil de gases y un equipo *DustMate* para cuantificar material particulado. Las emisiones de monóxido de carbono (CO) se registraron a intervalos de 1 minuto durante 15 minutos, manteniendo una distancia de 80 cm entre el punto de muestreo y la parrilla de combustión, equipada con una chimenea (Fig. 5).



Fig. 5 Medición de material particulado y monóxido de carbono.

De manera simultánea, las concentraciones de material particulado fino (PM_{2.5}) y material particulado grueso (PM₁₀) se midieron a intervalos de 30 segundos durante 15 minutos. En cada ensayo se utilizaron 1 kg de carbón de shihuahuaco y 1 kg de briquetas, manteniendo condiciones experimentales equivalentes de flujo de aire y temperatura [24].

III. RESULTADOS

Se presenta, en primer lugar, el detalle de las propiedades fisicoquímicas de las 30 briquetas (Fig. 3) en base a los 10 tratamientos propuestos. Luego se selecciona la composición óptima que cumplió en mayor medida con la Norma ISO 17225-3. Finalmente, se exponen los hallazgos relevantes en cuanto al nivel de emisiones de la briketa óptima en comparación con el combustible tradicional.

A. Propiedades fisicoquímicas de las briquetas

En relación con el análisis del efecto de la composición de biomasa y el porcentaje de aglutinante sobre las propiedades fisicoquímicas, se presentan los valores promedio obtenidos de las propiedades fisicoquímicas de las briquetas (Fig. 6-9).

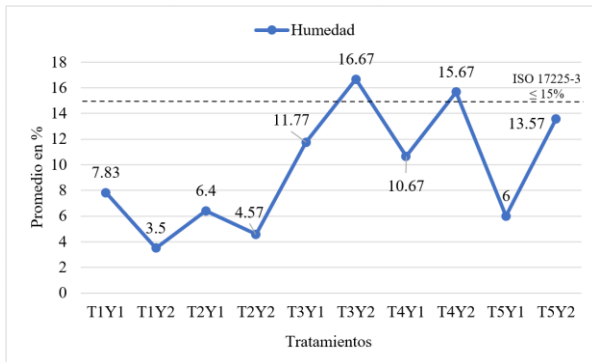


Fig. 6 Valores promedio de humedad para las briquetas.

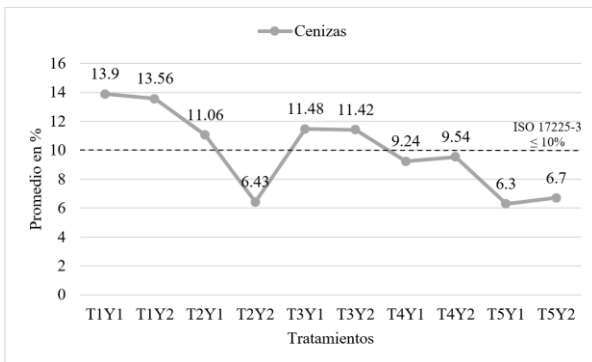


Fig. 7 Valores promedio de cenizas para las briquetas.

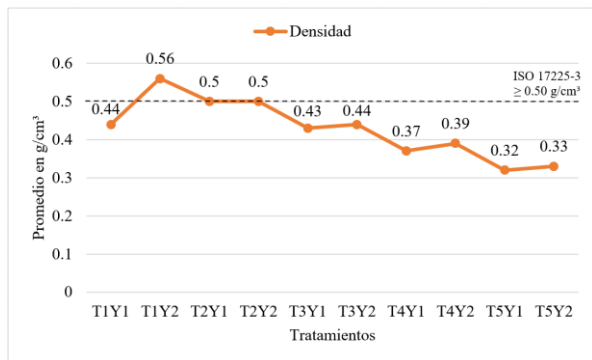


Fig. 8 Valores promedio de densidad para las briquetas.

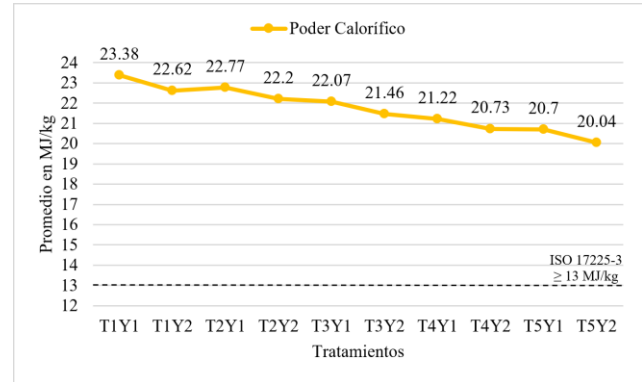


Fig. 9 Valores promedio de poder calorífico para las briquetas.

A partir de las figuras 6 a 9 se observa que los tratamientos presentan comportamientos diferenciados en las propiedades fisicoquímicas evaluadas. Si bien la mayoría muestra valores adecuados de poder calorífico, existen diferencias relevantes en parámetros como humedad, cenizas y densidad, lo que evidencia que no todas las formulaciones alcanzan un desempeño técnico integral. La identificación específica de los tratamientos que cumplen o no con los criterios técnicos se desarrolla en el subapartado B, mediante la comparación directa con los valores de referencia establecidos por la Norma ISO 17225-3.

Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico en Minitab, verificándose los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de errores para las variables humedad, densidad, cenizas y poder calorífico, lo que permitió aplicar un ANOVA de dos factores.

Para el ANOVA de dos factores, se consideró el tipo de mezcla (T1-T5), nivel de aglutinante, así como su interacción. Se evidenció que para la mayoría de los casos los valores p fueron menores a 0.05. Esto indica que tanto el tipo de mezcla como la proporción de aglutinante tienen un efecto significativo sobre las propiedades evaluadas. El ANOVA mostró que el tipo de tratamiento y el nivel de aglutinante influyen significativamente en la humedad, el contenido inorgánico (cenizas) y el grado de compactación o densidad de las briquetas ($p < 0.05$). En el poder calorífico, aunque ambos factores principales fueron significativos, la interacción Tratamiento*Aglutinante no lo fue ($p=0.404$).

Esto indica que el efecto del aglutinante es independiente del tipo de mezcla y que el desempeño energético está determinado principalmente por la biomasa utilizada.

TABLA 2
ANOVA PARA CADA PROPIEDAD FISICOQUÍMICA

Fuente	Humedad Valor p	Ceniza Valor p	Densidad Valor p	Poder calorífico Valor p
Tratamiento	0.000	0.000	0.000	0.000
Agglutinante	0.000	0.000	0.000	0.000
Tratamiento *Agglutinante	0.000	0.000	0.000	0.404

Posteriormente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con el propósito de identificar diferencias entre tratamientos. Además, se evaluó para el poder calorífico los factores principales por separado, debido a que la interacción no fue significativa.

Humedad				Cenizas			
Tratamiento*Aglutinante	N	Media	Agrupación	Tratamiento*Aglutinante	N	Media	Agrupación
T3 Y2	3	16.6667	A	T1 Y1	3	13.8967	A
T4 Y2	3	15.6667	A B	T1 Y2	3	13.5567	A
T5 Y2	3	13.5667	B C	T3 Y1	3	11.4833	B
T3 Y1	3	11.7733	C D	T3 Y2	3	11.4167	B
T4 Y1	3	10.6667	D	T2 Y1	3	11.0567	B
T1 Y1	3	7.8333	E	T4 Y2	3	9.5400	C
T2 Y1	3	6.4000	E F	T4 Y1	3	9.2400	C
T5 Y1	3	6.0000	E F	T5 Y2	3	6.7000	D
T2 Y2	3	4.5667	F G	T2 Y2	3	6.4333	D
T1 Y2	3	3.5000	G	T5 Y1	3	6.3000	D

Densidad			
Tratamiento*Aglutinante	N	Media	Agrupación
T1 Y2	3	0.563333	A
T2 Y1	3	0.503333	B
T2 Y2	3	0.496667	B C
T3 Y2	3	0.443333	C D
T1 Y1	3	0.440000	C D
T3 Y1	3	0.426667	D E
T4 Y2	3	0.393333	D E
T4 Y1	3	0.370000	E F
T5 Y2	3	0.333333	F
T5 Y1	3	0.323333	F

Poder calorífico			
Tratamiento	N	Media	Agrupación
T1	6	23.0000	A
T2	6	22.4817	B
T3	6	21.7650	B C
T4	6	20.9750	C D
T5	6	20.3733	D E

Fig. 10 Comparación de medias Tukey de las propiedades fisicoquímicas.

La prueba de Tukey evidenció diferencias funcionales entre los tratamientos. Los mayores contenidos de humedad observados en T3Y2 y T4Y2 no resultan convenientes, ya que afectan negativamente la eficiencia de combustión, mientras que las formulaciones con mayor proporción de cacao (T1Y2 y T2Y2) presentan valores más favorables al reducir pérdidas energéticas durante la ignición. En cuanto a las cenizas, los tratamientos con mayor proporción de cáscara de coco mostraron contenidos más bajos, reduciendo así la generación de residuos inorgánicos tras la combustión.

Respecto a la densidad, valores elevados como los de T1Y2 favorecen la estabilidad física del biocombustible. Sin embargo, este parámetro debe evaluarse de manera conjunta con los demás criterios técnicos. Para el poder calorífico, al no ser significativa la interacción Tratamiento*Aglutinante ($p = 0.404$), se analizaron los efectos principales. Los resultados indican que el tipo de biomasa determina el aporte energético y un mayor contenido de aglutinante reduce el poder calorífico.

B. Evaluación comparativa con la Norma ISO 17225-3

Con respecto al objetivo de comparar las propiedades fisicoquímicas de las briquetas con los parámetros establecidos en la Norma ISO 17225-3 (clase B), se realizó una evaluación de todas las formulaciones desarrolladas. La selección del biocombustible óptimo requirió una evaluación de todas las formulaciones de briquetas frente a los parámetros establecidos en la Norma ISO 17225-3 (clase B). Por lo tanto, con el fin de determinar el grado de conformidad técnica de las briquetas producidas, se procedió a comparar los valores de humedad,

cenizas, densidad y poder calorífico obtenidos en laboratorio con los umbrales definidos por dicha normativa, utilizada como estándar de referencia.

TABLA 3
CUMPLIMIENTO CON LA ISO 17225-3

Mezcla	H (%)	VR ≤ 15%	C (%)	VR ≤ 10%	D (g/cm³)	VR ≥ 0.50 g/cm³	PC (MJ/kg)	VR ≥ 13 MJ/kg
T1Y1	7.83	Sí	13.90	No	0.44	No	23.38	Sí
T1Y2	3.50	Sí	13.56	No	0.56	Sí	22.62	Sí
T2Y1	6.40	Sí	11.06	No	0.50	Sí	22.77	Sí
T2Y2	4.57	Sí	6.43	Sí	0.50	Sí	22.20	Sí
T3Y1	11.77	Sí	11.48	No	0.43	No	22.07	Sí
T3Y2	16.67	No	11.42	No	0.44	No	21.46	Sí
T4Y1	10.67	Sí	9.24	Sí	0.37	No	21.22	Sí
T4Y2	15.67	No	9.54	Sí	0.39	No	20.73	Sí
T5Y1	6.00	Sí	6.30	Sí	0.32	No	20.70	Sí
T5Y2	13.57	Sí	6.70	Sí	0.33	No	20.04	Sí
Total	8/10		Total	5/10	Total	3/10	Total	10/10

De acuerdo con los resultados, en primer lugar, para el contenido de humedad (H), se observó que los ocho tratamientos cumplieron con el valor de referencia (VR) establecido ($\leq 15\%$). En cuanto al contenido de cenizas (C), solo cinco (T2Y2, T4Y1, T4Y2, T5Y1 y T5Y2) cumplieron con el límite máximo ($\leq 10\%$). Esto representa una ventaja desde el punto de vista ambiental, al reducir la generación de residuos sólidos tras la combustión. En tercer lugar, para la densidad (D), únicamente tres tratamientos (T1Y2, T2Y1 y T2Y2) alcanzaron el valor mínimo requerido. La mayor densidad se asocia a una mejor compactación y mayor estabilidad física del biocombustible. En cuarto lugar, el poder calorífico (PC) presenta un desempeño sobresaliente, cumpliendo en los 10 tratamientos (≥ 13 MJ/kg). Estos resultados sugieren que la combinación de coco y cacao ofrece un alto aporte energético, más allá de la combinación de sustratos. En conjunto, se destaca la mezcla T2Y2 ya que cumplió con todos los parámetros de la norma, siendo el único de dichas combinaciones. Por lo tanto, el tratamiento T2Y2 se selecciona como el óptimo para la evaluación de emisiones atmosféricas frente al carbón de shihuahuaco.

C. Impacto ambiental: Emisiones de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y CO

Finalmente, con el objetivo de evaluar el impacto ambiental de la sustitución del carbón de shihuahuaco por briquetas, se analizaron las emisiones generadas durante la combustión de la briqueta óptima T2Y2 (75% cacao + 25% coco, 15% aglutinante). Para ello, se recolectaron datos empleando equipamiento especializado de medición de emisiones. Para el caso de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se tomaron 30 valores durante 15 minutos con el equipo *DustMate* y para el CO se tomaron 15 valores durante 15 minutos con el analizador de gases *MultiRAE*.

Como se observa en la fig. 11, el carbón shihuahuaco presentó picos de emisión extremadamente altos de PM_{10} , con valores de hasta $420.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en el minuto 6) y se mantuvo consistente por encima de $236 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante todo el muestreo. Estos valores iniciales fueron críticos, ya que superaron los límites de calidad de aire. Por su parte la briqueta T2Y2 mantuvo emisiones de PM_{10} en un rango más estrecho y significativamente menor, con un valor máximo de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$, manteniéndose estable en el rango de 130 a $139.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ después de los primeros minutos.

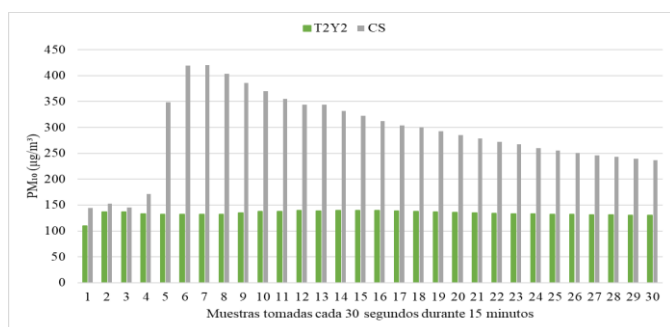


Fig. 11 Emisiones de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre T2Y2 y Carbón Shihuahuaco (CS).

El análisis estadístico se llevó a cabo para confirmar si la reducción de emisiones observada entre el carbón shihuahuaco y la briqueta óptima T2Y2 era estadísticamente significativa. La prueba de normalidad aplicada a las concentraciones de PM_{10} evidenció que los datos correspondientes a la briqueta T2Y2 no siguen una distribución normal, mientras que los del carbón de shihuahuaco sí la cumplen. Ante esta situación, y considerando que una de las muestras no presenta normalidad, se procedió a aplicar la prueba no paramétrica de Mann-Whitney U.

El análisis estadístico confirmó diferencias significativas entre las emisiones de PM_{10} de la briqueta T2Y2 y el carbón de shihuahuaco ya que obtuvo un valor $p = 0.000$, siendo menor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$). Además, la briqueta presentó una mediana de $134.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, considerablemente inferior a la del carbón ($288.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), evidenciando una reducción sustancial de material particulado fino durante la combustión.

Por su parte, el análisis de $PM_{2.5}$ (Fig. 12) también evidenció una mejora clara con el uso de las briquetas en contraste con el carbón shihuahuaco. Este alcanzó un pico máximo de $86.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en el minuto 6) y se mantuvo en un promedio superior a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la mayor parte del muestreo. En contraste, la formulación T2Y2 mostró emisiones notablemente estables y bajas, con un rango máximo de $52.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un promedio cercano a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante todo el periodo. Aunque los valores de T2Y2 son también altos comparados con las normas de calidad del aire, la diferencia respecto al CS muestra un claro beneficio ambiental y de salud en términos de material particulado fino.

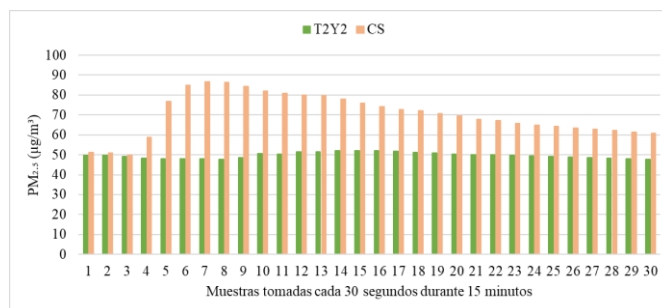


Fig. 12 Emisiones de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre T2Y2 y Carbón Shihuahuaco (CS).

Tras verificarse la normalidad de ambas muestras, se aplicó la prueba T de Student para comparar las medias. Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en las emisiones de $PM_{2.5}$ debido al valor $p = 0.000$. La briqueta T2Y2 presentó una media de $49.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$, inferior a la del carbón de shihuahuaco ($70.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), confirmando que existen diferencias significativas entre las emisiones de $PM_{2.5}$ de ambos combustibles y por ende un mejor desempeño ambiental de la briqueta.

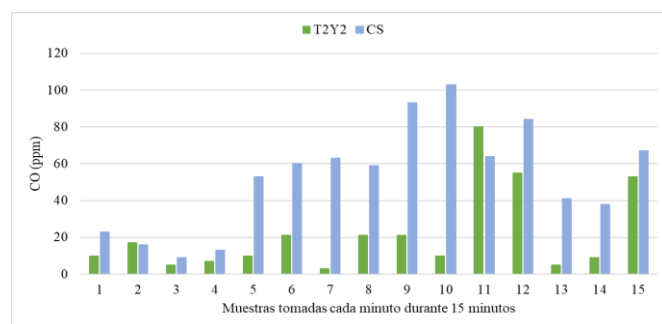


Fig. 13 Emisiones de CO (ppm) entre T2Y2 y Carbón Shihuahuaco (CS).

Los resultados respecto a las concentraciones de CO evidencian diferencias claras entre la briqueta T2Y2 y el carbón shihuahuaco. Se observó que el carbón presentó emisiones más elevadas y variables durante el muestreo, alcanzando picos de hasta 103 ppm. Mientras que la briqueta T2Y2 mostró emisiones de CO que se mantuvieron cerca o debajo de 21 ppm en los primeros minutos. Si bien dicha briqueta presentó picos más altos hacia el final del muestreo (máximo 80 ppm y 55 ppm), el promedio general de sus emisiones fue considerablemente menor y más controlable en fases iniciales de combustión.

En cuanto a los resultados de la prueba de normalidad, estos indicaron que solo una de las muestras cumplió con este supuesto, por lo que se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney U. El análisis evidenció diferencias estadísticamente significativas en las emisiones de CO entre ambos combustibles dado que el valor $p = 0.003$, con medianas de 10 ppm para la briqueta T2Y2 y 59 ppm para el carbón de shihuahuaco. Ello confirma que el uso de briquetas T2Y2 permite reducir de manera significativa las emisiones de CO durante la combustión.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten discutir el desempeño de las briquetas a partir del efecto de la composición de biomasa y del porcentaje de aglutinante sobre sus propiedades fisicoquímicas, el nivel de cumplimiento respecto a los parámetros establecidos en la Norma ISO 17225-3 y el impacto ambiental asociado a la sustitución del carbón de shihuahuaco por briquetas elaboradas con residuos agrícolas.

Respecto al primer grupo de resultados, estos evidenciaron una relación directa entre el contenido de humedad y la densidad aparente. En los diez tratamientos evaluados, donde se variaron la proporción de biomasa y el contenido de aglutinante, los valores de humedad oscilaron entre 3.5 % y 16.67 %, mientras que la densidad se ubicó entre 0.32 y 0.56 g/cm³.

En términos generales, los tratamientos con menor contenido de humedad tendieron a presentar mayores valores de densidad, lo que sugiere un mayor grado de compactación y una reducción de la porosidad interna del material [25] [26]. Esta relación inversa ha sido ampliamente reportada por, Elsis et al [27] y Hakim et al. [21] donde se señala que una compactación eficiente limita la absorción y retención de agua al reducir los vacíos interparticulares, mejorando la estabilidad física de las briquetas [24]. En este estudio, los tratamientos T1Y2 y T2Y2, caracterizados por una mayor proporción de cacao y un contenido de aglutinante del 15 %, registraron simultáneamente los valores más bajos de humedad, confirmando este comportamiento.

Si bien el control de la granulometría (tamaño de partícula menor a 1 mm) y el secado previo del material fueron condiciones aplicadas de manera uniforme en todos los tratamientos, estos factores no explican por sí solos la variabilidad observada en los valores finales de humedad y densidad. Las diferencias se atribuyen principalmente a la composición de la biomasa y a la dosificación del aglutinante. En particular, el almidón de yuca actuó como agente de unión y relleno, promoviendo una briketa más homogénea, lo que incrementó la densificación y redujo la porosidad efectiva del material compactado. Resultados similares fueron reportados por Nonsawang et al. [10] quienes señalan que incrementos moderados en el contenido de aglutinante favorecen la cohesión interna sin afectar negativamente el desempeño energético de las briquetas.

Respecto a la densidad, los valores obtenidos cumplen parcialmente con el valor mínimo recomendado por la Norma ISO 17225-3. El tratamiento T1Y2 alcanzó la mayor densidad (0.56 g/cm³), mientras que los tratamientos T2Y1 y T2Y2 presentaron valores cercanos (0.50 g/cm³). Estos resultados son comparables con los reportados por Brunerová et al. [25] y Nonsawang et al. [10] para briquetas producidas con prensas de baja presión, confirmando que la densidad final no depende exclusivamente del nivel de presión aplicada, sino de la

interacción entre el tiempo de compactación, composición de la biomasa y contenido de aglutinante. Desde un punto de vista técnico, una menor humedad y una mayor densidad son condiciones recomendables, ya que mejoran la resistencia mecánica, la estabilidad durante el almacenamiento y la eficiencia del proceso de combustión de las briquetas.

En relación con el contenido de cenizas, los valores obtenidos oscilaron entre 6.3 % y 13.9 %. Las briquetas con predominio de cáscara de cacao como los tratamientos T1Y1 y T1Y2 presentaron los valores más elevados, superando el límite máximo del 10 % establecido por la Norma ISO 17225-3. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Akolgo et al. [19] y Ofori et al. [28] quienes señalan que residuos agrícolas con mayor fracción inorgánica tienden a generar mayores contenidos de ceniza durante la combustión. En el presente estudio, no se observó una tendencia clara entre el contenido de aglutinante y el porcentaje de cenizas, lo que indica que este parámetro está dominado principalmente por la naturaleza de la biomasa y no por la dosificación del aglutinante.

La incorporación de cáscara de coco permitió reducir significativamente el contenido de cenizas, mejorando la calidad del biocombustible. En particular, los tratamientos T2Y2 y T5Y1 alcanzaron valores de 6.43 % y 6.30 %, respectivamente, manteniéndose dentro del rango normativo. Este resultado confirma que una formulación equilibrada entre ambos tipos de biomasa permite optimizar el desempeño del combustible sólido, reduciendo los residuos inorgánicos y favoreciendo una combustión más limpia, en concordancia con lo reportado por Akolgo et al. [19].

En cuanto al poder calorífico, las briquetas evaluadas presentaron valores comprendidos entre 20.04 y 23.38 MJ/kg, superando en todos los tratamientos el valor mínimo de 13 MJ/kg exigido por la Norma ISO 17225-3. Estos valores son comparables con los reportados por Anis et al. [29] y Nonsawang et al. [10] para briquetas elaboradas con residuos agrícolas, confirmando la viabilidad energética de las formulaciones desarrolladas. Si bien el tratamiento T1Y1 registró el mayor poder calorífico, el tratamiento T2Y2 fue el único que cumplió simultáneamente con los cuatro parámetros normativos, lo que justifica su selección como briketa óptima para evaluaciones posteriores.

En relación con el cumplimiento de la Norma ISO 17225-3, los resultados obtenidos permiten contextualizar la calidad de las briquetas elaboradas a partir de cáscaras de cacao y coco frente a criterios internacionales aplicables a biocombustibles sólidos. En la investigación de Cesprini et al. [31], señalan que la calidad de estos biocombustibles se encuentra estandarizada bajo la serie ISO 17225, en la cual el origen de la biomasa constituye un factor determinante en las propiedades finales del producto. En esa misma línea, Ifa et al. [32] evaluaron briquetas elaboradas con cáscaras de anacardo y reportaron un poder calorífico de 29.49 MJ/kg, humedad de 5.3 %, cenizas de 4.96 %, material volátil de 17.16 % y carbono fijo de 72.62 %,

valores que se encontraron dentro de los límites establecidos por la Norma ISO 17225-3. Asimismo, Hansted et al. [33] destacan que esta norma define criterios específicos para parámetros como el contenido de cenizas y el poder calorífico, los cuales resultan determinantes para la clasificación y aplicación energética de las briquetas.

En este contexto, los resultados fisicoquímicos obtenidos en el presente estudio permiten evaluar la calidad de las briquetas elaboradas mediante su comparación con los parámetros establecidos en la Norma ISO 17225-3. A partir de este contraste, se evidencia que las briquetas de cáscaras de cacao y coco presentan viabilidad energética, con valores de poder calorífico entre 20.04 y 23.38 MJ/kg, sin embargo, el contenido de cenizas, comprendido entre 6.3 % y 13.9 %, representa el principal factor que condiciona el cumplimiento normativo de determinadas formulaciones.

Desde una perspectiva ambiental, el análisis de emisiones confirmó el potencial de las briquetas como alternativa al carbón de shihuahuaco. Las pruebas de combustión evidenciaron reducciones significativas en las emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado fino (PM₁₀ y PM_{2.5}), asociadas principalmente a una combustión más completa. En comparación con el carbón, el tratamiento T2Y2 presentó una reducción aproximada del 70 % en las emisiones de CO, así como disminuciones superiores al 40 % en PM₁₀ y PM_{2.5}.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ngene et al. [30], quienes reportaron reducciones superiores al 40% de metano y CO₂ en briquetas de biocarbón, mientras que Akolgo et al. [19], registraron un 80% menos de CO al comparar briquetas y carbón vegetal tradicional. Estos autores destacan que las briquetas de biomasa presentan mayores contenidos de compuestos volátiles y una estructura más porosa, lo que favorece la difusión de oxígeno y la oxidación del combustible.

Adicionalmente, la composición química de la cáscara de coco contribuye a una menor formación de hollín y partículas finas durante la combustión como lo menciona Akolgo et al. [19] y Li et al. [20], lo que explica el mejor desempeño ambiental del tratamiento T2Y2. Estos resultados representan un beneficio directo para la calidad del aire, ya que las concentraciones de PM_{2.5} se mantuvieron cercanas al valor guía de 50 µg/m³ recomendado por la Organización Mundial de la Salud [1].

En consecuencia, el uso de briquetas formuladas a partir de residuos de coco y cacao se consolida como una alternativa ambientalmente superior frente al carbón vegetal tradicional, contribuyendo a la mitigación de la contaminación atmosférica y a la protección de la salud ocupacional.

V. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar de manera integral el desempeño técnico y ambiental de briquetas elaboradas a partir de cáscaras de cacao y coco como alternativa energética sostenible al carbón de shihuahuaco (*Dipteryx micrantha*). Los resultados de la composición de biomasa y el porcentaje de aglutinante en las briquetas demostraron que la formulación T2Y2 (75 % cacao, 25 % coco y 15 % de aglutinante de yuca) presentó las mejores propiedades fisicoquímicas, evidenciando un desempeño técnico superior frente a las demás combinaciones evaluadas. Además, se comprobó que cumple con los cuatro criterios establecidos por la norma ISO 17225-3. Finalmente, en términos de impacto ambiental, la briketa T2Y2 logró reducciones significativas en las emisiones de PM₁₀, PM_{2.5} y CO en comparación con el carbón de shihuahuaco, alcanzando disminuciones superiores al 50 %.

En conjunto, se demuestra que el uso de briquetas elaboradas a partir de cáscaras de cacao y coco constituyen una alternativa energética viable y pueden contribuir de manera efectiva a la mitigación de la contaminación atmosférica y a la mejora de la calidad del aire. Su implementación podría contribuir a la reducción de la deforestación asociada a la extracción de especies amazónicas como el shihuahuaco.

AGRADECIMIENTO

Deseamos agradecer especialmente a la señora Imelda y su esposo Ezequiel, productores del fundo “Mamá Imelda”, por su valiosa colaboración en la provisión de información y las materias primas utilizadas en la elaboración de las briquetas de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). Calidad del aire ambiente y salud. Recuperado de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [2] CEPLAN. (2023). Observatorio Nacional Prospectivo. <https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t62>
- [3] Pretto, F. (2024). Evaluación de Emisiones de Gases (CO, NOx) generados por Hornos de Pollería para formular una Propuesta de Plan de Mitigación, ubicados en la Avenida Lima, Distrito de Mariano Melgar, Arequipa 2022. (Tesis de título profesional, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú). <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/5b2950f0-25d2-44ea-9c68-1555de566b46>
- [4] Flores, M., & Machaca, M. (2024). Evaluación ambiental de briquetas de biomasa. (Tesis de título profesional, Universidad privada de Tacna. Repositorio UPT. Tacna, Perú). <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/3561/Flores-Yufra-Machaca-Rivera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] Cuestas, D. & Huayna, A. (2021). Evaluación del impacto ambiental, a la salud y económico de la conversión de hornos convencionales a hornos ecológicos en las pollerías de Lima Metropolitana. REVISTA AMBIENTAL N° 10, AÑO 2021. Recuperado de <https://dgroups.org/?nza0sfpl>
- [6] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2019). SERFOR exhorta a pollerías el uso de carbón vegetal de procedencia legal. <https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/45819-dia-del-pollo-a-la-brasa-serfor-exhorta-a-pollerias-uso-de-carbon-vegetal-de-procedencia-legal>

- [7] Espinoza, T. (2025). Usar pisos de parquet de un árbol que tiene 800 años, más que un lujo o progreso, debería ser visto como una aberración. Recuperado de <https://es.mongabay.com/podcast/shihuahuaco-amenazas-tala-peru-entrevista/>
- [8] IQAir. (2025). Air quality in Yurimaguas. <https://www.iqair.com/us/peru/loreto/yurimaguas>
- [9] Armenta, G. (2020). La cadena de valor del cacao en el estado de Guerrero, México (Tesis de maestría, Universidad de la Salle Bajío). https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/armenta_campas_g/etd_4061012677382.pdf
- [10] Nonsawang, S., Juntahum, S., Sanchumpu, P., Suaili, W., Senawong, K., & Laloon, K. (2024). Unlocking renewable fuel: Charcoal briquettes production from agro-industrial waste with cassava industrial binders. *Energy Reports*, 12, 4966–4982. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.10.053>
- [11] Mayers, A. (16 de mayo de 2022). Free deforestation agreement readies Peruvian cocoa for new European market regulations. *Confectionery News*. <https://www.confectionerynews.com/Article/2022/05/16/free-deforestation-agreement-readies-peruvian-cocoa-for-new-european-market-regulations/>
- [12] Cabezas, D., Jiménez, M., Torres, R., & Bustamante, J. (2024). Huella de carbono en residuos postcosecha de Theobroma cacao L. y la economía circular. *Agroecología Global. Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 6(11), 4-20. Epub 05 de diciembre de 2024. <https://doi.org/10.35381/a.g.v6i11.4143>
- [13] Ricapa, Y., Saldaña, E., Samán, D. & Vilchez, M. (2020). Elaboración de alfombras a partir de fibras de residuos de coco. Universidad San Ignacio de Loyola. <https://repositorio.usil.edu.pe/entities/publication/87d5a737-f2a9-48a8-9b41-ff9a4361cb0a>
- [14] Benites, E., & Diaz, P. (2019). PODER CALORÍFICO DE BRIQUETAS ELABORADAS CON BIOMASA Y AGLUTINANTES ORGÁNICOS. *DYNA ENERGIA Y SOSTENIBILIDAD*, 8(1), [12 p.]-[12 p.]. <https://doi.org/10.6036/es9113>
- [15] Kabir Ahmad, R., Anwar Sulaiman, S., Yusup, S., Sham Dol, S., Inayat, M., & Aminu Umar, H. (2022). Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101499. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2021.05.013>
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (1987). NTC 2060: Briquetas de combustibles para uso doméstico. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/gp-briquetas-combustibles-para-uso-domestico-ntc2060-1987.html>
- [17] Hansted, A. L. S., Boschert, C., Hawboldt, K. A., Newell, W. J., & Yamaji, F. M. (2024). Impact of densification process on unprocessed biomass and post-hydrothermal carbonization. *Biomass and Bioenergy*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107203>
- [18] Cesprini, E., Resente, G., Causin, V., Urso, T., Cavalli, R., & Zanetti, M. (2020). Energy recovery of glued wood waste – A review. *In Fuel* (Vol. 262). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116520>
- [19] Akolgo, G. A., Awafo, E. A., Essandoh, E. O., Owusu, P. A., Uba, F., & Adu-Poku, K. A. (2021). Assessment of the potential of charred briquettes of sawdust, rice and coconut husks: Using water boiling and user acceptability tests. *Scientific African*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00789>
- [20] Li, G., Hu, R., Hao, Y., Yang, T., Li, L., Luo, Z., Xie, L., Zhao, N., Liu, C., Sun, C., & Shen, G. (2023). CO₂ and air pollutant emissions from bio-coal briquettes. *Environmental Technology and Innovation*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102975>
- [21] Hakim, L., Iswanto, A. H., Lubis, Y. S., Wirawan, A. J., Batubara, R., Kim, N. H., Antov, P., Rogoziński, T., Hua, L. S., Chen, L. W., Selvasembian, R., Jayusman, & Sutiawan, J. (2025). Charcoal Briquette Manufactured from Indonesian Sugar Palm Bunches (*Arenga longipes* Moega) as Biomass-Based New Renewable Energy. *Journal of Renewable Materials*, 13(3), 639–652. <https://doi.org/10.32604/jrm.2025.056365>
- [22] Nganko, J. M., Koffi, E. P. M., Gbaha, P., Toure, A. O., Kane, M., Ndiaye, B., Faye, M., Nkouna, W. M., Tiogue Tekounegning, C., Bile, E. E. J., & Yao, K. B. (2024). Modeling and optimization of compaction pressure, binder percentage and retention time in the production process of carbonized sawdust-based biofuel briquettes using response surface methodology (RSM). *Heliyon*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25376>
- [23] Nurek, T., Gendek, A., Roman, K., & Dąbrowska, M. (2019). The effect of temperature and moisture on the chosen parameters of briquettes made of shredded logging residues. *Biomass and Bioenergy*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105368>
- [24] Jelonek, Z., Drobnik, A., Mastalerz, M., & Jelonek, I. (2020). Environmental implications of the quality of charcoal briquettes and lump charcoal used for grilling. *Science of the Total Environment*, 747. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141267>
- [25] Brunerová, A., Brožek, M., van Dung, D., Phung, L. D., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Chaloupková, V., & Roubík, H. (2024). Manual wooden low-pressure briquetting press: An alternative technology of waste biomass utilisation in developing countries of Southeast Asia. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140624. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.140624>
- [26] Mustafa, S., & Ibrahim, S. (2023). Bioresources and Environment Thermal and Physical Properties of Briquette Fuels from Coconut Shells and Cocoa Shells. In *Bioresources and Environment* (Vol. 2023, Issue 3). www.bioenvuitm.com
- [27] Elsis, S. F., Omar, M. N., Azam, M. M., Eissa, A. H. A., & Gomaa, E. M. (2025). Effect of pyrolysis process on the properties of briquettes produced from different particle size peanut shells and grape pruning residues. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107532. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2024.107532>
- [28] Ofori, P. & Akoto, O. (2020). Production and Characterisation of Briquettes from Carbonised Cocoa Pod Husk and Sawdust. *OALib*. 07. 1-20. https://www.researchgate.net/publication/339530697_Production_and_Characterisation_of_Briquettes_from_Carbonised_Cocoa_Pod_Husk_and_Sawdust
- [29] Alves, C., Evtyugina, M., Vicente, E., Vicente, A., Rienda, I. C., de la Campa, A. S., Tomé, M., & Duarte, I. (2023). PM_{2.5} chemical composition and health risks by inhalation near a chemical complex. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 860–874. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2022.02.013>
- [30] Ngene, G. I., Bouesso, B., González Martínez, M., & Nzihou, A. (2024). A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. *Journal of Cleaner Production*, 469, 143193. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.143193>
- [31] Cesprini, E., Resente, G., Causin, V., Urso, T., Cavalli, R., & Zanetti, M. (2019). Energy recovery of glued wood waste – A review. *Fuel*, 262, 116520. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116520>
- [32] Ifa, L., Yani, S., Nurjannah, N., Darnengsih, D., Rusnaenah, A., Mel, M., Mahfud, M., & Kusuma, H. S. (2020). Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon*, 6(9), e05009. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009>
- [33] Hansted, A. L. S., Boschert, C., Hawboldt, K. A., Newell, W. J., & Yamaji, F. M. (2024). Impact of densification process on unprocessed biomass and post-hydrothermal carbonization. *Biomass and Bioenergy*, 184, 107203. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107203>